

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.05.13

单轴摆式加速度计输出异常的故障分析

党静¹, 余臻², 刘宇²

(1. 空装驻北京地区第四军事代表室, 北京 100095;

2. 航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 针对某型单轴摆式加速度计在使用过程中出现的电压输出异常典型故障问题进行理论分析, 利用故障树综合性分析方法, 层层追踪分析, 表达出输出电压出现异常故障内在联系, 直观指出单元故障与整体故障之间的逻辑关系, 切实归纳总结了工程运用中实际遇到的单轴摆式加速度计输出电压异常故障问题。而后对故障原因进行精确细致定位, 提出振荡器电路中的 D4 二极管正极金丝断裂为此型号加速度计故障根本原因, 融入电路金丝断裂机理分析法, 并通过试验测试与改进措施方式验证了此故障分析的准确性, 一定程度上提升了加速度计可靠性。研究成果可以为加速度计可靠性使用提供一定参考。

关键词: 惯测; 单轴摆式; 加速度计; 故障分析; 金丝断裂

中图分类号: TB9; TH824

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)05-0091-06

Analysis of abnormal output fault of single axis pendulum accelerometers

DANG Jing¹, YU Zhen², LIU Yu²

(1. The Fourth Military Representative Office stationed in Beijing, Beijing 100095, China;

2. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The oretical analysis is conducted on the typical fault problem of abnormal voltage output during the use of a certain type of single axis pendulum accelerometer. The fault tree comprehensive analysis method is used to track and analyze layers by layers, expressing the internal relationship between abnormal output voltage faults and intuitively pointing out the logical relationship between unit faults and overall faults, We have effectively summarized and summarized the problem of abnormal output voltage faults of single axis pendulum accelerometers encountered in engineering applications. Then, the cause of the fault was accurately and meticulously located, and the D4 diode positive electrode gold wire fracture in the oscillator circuit was proposed as the root cause of the accelerometer fault. The circuit gold wire fracture mechanism analysis method was incorporated, and the accuracy of this fault analysis was verified through experimental testing and improvement measures, which to some extent improved the reliability of the accelerometer. The research results can provide a certain reference for the reliable use of accelerometers.

Key words: inertial measurement; single axis pendulum; accelerometer; fault analysis; gold wire fractur

0 引言

悬丝支承结构的单轴摆式加速度计, 具有体

积小、功耗低、灵敏度高、过载能力大、工作温度范围宽和抗振动冲击能力强等优点^[1], 目前广泛应用在各类惯导系统和飞控系统中, 主要用于测

收稿日期: 2023-11-02; 修回日期: 2023-11-13

引用格式: 党静, 余臻, 刘宇. 单轴摆式加速度计输出异常的故障分析[J]. 计测技术, 2023, 43(5): 91-96.

Citation: DANG J, YU Z, LIU Y. Analysis of abnormal output fault of single axis pendulum accelerometers[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(5): 91-96.



量运动载体坐标系上的线加速度^[2],并通过惯导系统和飞控系统解算出运动载体的速度和位移等导航参数,实现精确制导和导航^[3]。近几年,随着现代装备可靠性水平的迅速提高,对加速度计在惯导系统和飞控系统的使用可靠性提出了更高要求^[4],因此,工程运用中的加速度计故障问题亟待解决。

不少学者针对加速度计的故障进行分析研究,提出了相应的解决方法。董浩森等人提出了对内弹道加速度信号的误差进行优化的方法^[5];张朋好等人针对悬丝支承摆式加速度计的输出零位偏离问题进行研究,得出输出零位偏离是由信号传感器对称线圈发生形变导致的结论^[6-7];段然等人对单轴摆式加速度计悬丝断裂进行故障分析^[8]。针对加速度计电压输出异常问题,众多学者也进行了相关探究,但只停留在实际工程应用经验上,未对相关故障分析进行理论汇总。未见国内对于这类的输出异常故障原因分析的报道。

在工程实践中,发现某型单轴摆式加速度计电压输出异常情况。加速度计输出电压出现异常降低了加速度计在惯导系统和飞控系统的使用可靠性,对加速度计惯测可靠性造成了很大影响。本文对单轴摆式加速度计电压输出异常问题研究,旨在提升加速度计在使用过程中的可靠性。

1 理论研究

加速度计是惯测组合中的重要元件之一,测量沿输入轴向的线加速度,并输出加速度信号,以用于惯导和飞控。某型加速度计的测量范围为 $-50\text{ g}\sim+50\text{ g}$,标度因数为 0.32 mA/g ,输出端外接 $500\ \Omega$ 的采样电阻将电流信号转换为电压信号,对应的标度因数为 0.16 V/g 。在某型单轴摆式加速度计进行装配试验时,发生一起电压输出异常的故障。通过表头、电路互换分析,正常输出电压 $150\sim 160\text{ mV}$,异常输出电压小于 5 mV 。以下将通过相关理论分析,查找故障原因,进而排除故障。

1.1 加速度计组成及原理

如图1所示,在被测加速度作用下,惯性质量块绕悬丝产生摆动,使与摆框架固联的涡流片产生位移^[9],涡流片与两个线圈的距离一个变近,一个变远。振荡器电路块产生的正弦信号施加到两

个线圈上,由于距离的差动变化使得振荡器电路中检波电路输出小信号,提供给放大器电路小信号,放大后输出电流信号。该电流信号有两个作用:一是作为反馈的再平衡电流,流经力矩器使得涡流片始终处于平衡位置;二是作为加速度计的输出电流信号,表征了输入加速度的大小。

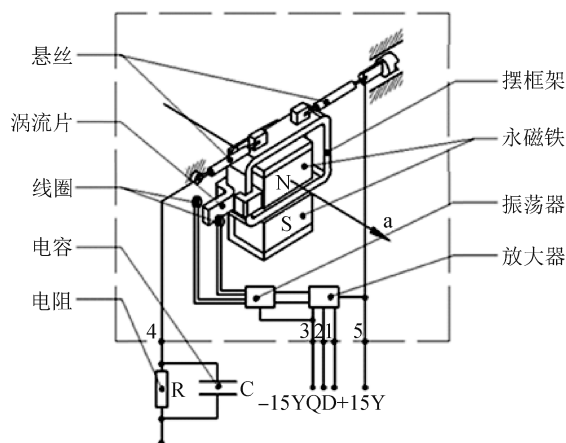


图1 加速度计工作原理

Fig.1 Working principle of accelerometer

1.2 加速度计故障机理分析

振荡器电路由稳幅电路、LC谐振电路、检波输出电路组成^[10],主要用于产生高频正弦波信号并检波输出,同时为放大器电路提供输入信号。如图2所示,红叉为金丝断开的位置。

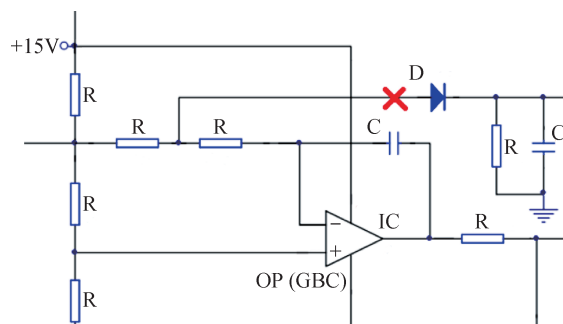


图2 振荡器部分电路图

Fig.2 Oscillator circuit diagram

1) 稳幅电路

电路内有振幅控制电路,稳压输出 6.2 V 供给后级电路。振幅控制电路通过二极管和电容电阻组成的振幅峰值检测电路,把检测的峰值与参考电压进行比较^[11],将其误差电压放大,并进行积分。振幅控制电路的输出连接到振荡电路中,用

来控制振荡幅度。

2) LC谐振电路

三极管和选频网络组成三点式 LC 振荡电路^[12]，频率 $f=1/(2\pi LC)$ 。LC 振荡电路输出为正弦波信号，在全温工作范围(-55~125℃)输出频率稳定，输出幅度一致性好。

3) 检波输出电路

前级正弦波信号由电容耦合并通过两负载线圈(夹具内)输入到检波电路，然后由检波电路将谐振正弦波信号变成脉动直流信号输出。在负载线圈和4个二极管完全对称的情况下，输出应为0V。二极管D4位于电路中第一级稳幅电路中，由于失效形式为断路，稳幅电路无输出，导致振荡电路无输出，从而造成加速度计无输出。

实际测量中该加速度计电压为2~5 mV，这与振荡器电路残留的微小电压(μV级)经过放大器电路被放大1 000倍左右以及放大器电路本身的漂移有关。

2 故障定位与分析

2.1 故障树分析

根据该型加速度计的结构组成和工作原理，结合该产品出现的输出异常，对可能造成输出异常的各种因素进行综合分析，建立了该型加速度

计电压输出异常故障树，见图3。

根据图3可知，共有8个相互独立的可能出现的故障原因，如表1所示，逐一对其进行分析、排查^[13]，定位实际故障。

根据表1故障树分析和排查，不能排除放大器电路、振荡器电路出现故障导致该加速度计出现输出异常的原因^[14]。

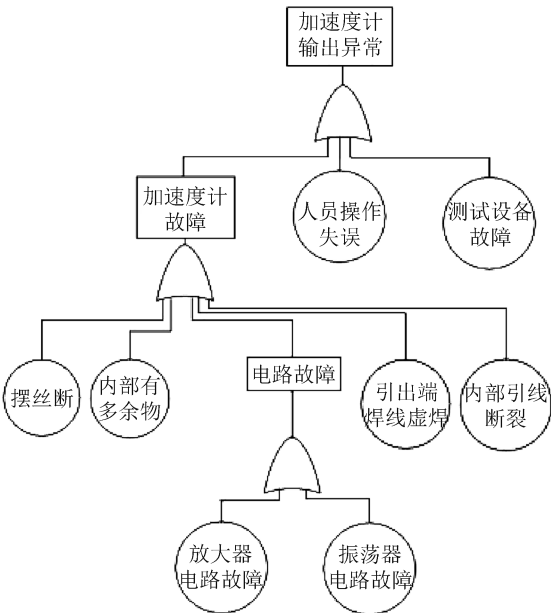


图3 加速度计输出异常故障树
Fig.3 Accelerometer output abnormal fault tree

表1 加速度计故障信息原因事件分析表

Tab.1 Cause and event analysis of accelerometer fault Information

序号	原因事件	分析方法和途径	分析结果
1	摆丝断	经从外部测量摆电阻,电阻值正常	排除该原因
2	人员操作失误	经了解,试验中人员操作均按要求执行	排除该原因
3	测试设备故障	经查测试设备均正常	排除该原因
4	引出端焊线虚焊	通过目视和测量,引出端无虚焊	排除该原因
5	加速度计内部有多余物	开壳后通过目视和在显微镜下检查,加速度计内部无多余物 ^[13]	排除该原因
6	内部引线断裂	开壳后通过目视、显微镜检查和测量,内部引线连接正常,无引线断裂	排除该原因
7	放大器电路故障	通过更换电路组件,确定故障原因在电路组件,需返厂进一步排查	不能排除该原因
8	振荡器电路故障	通过更换电路组件,确定故障原因在电路组件,需返厂进一步排查	不能排除该原因

2.1.1 放大器电路故障

针对可能存在的放大器电路故障问题，拆下该加速度计的电路组件，安装到同型号的另一支输出正常的加速度计的底座进行试验；并采用同

型号的输出正常的电路组件，安装到该故障加速度计底座上，通电进行试验。

交换电路组件试验表明：装配了故障加速度计的电路组件输出在0 V附近，输出值异常；故障

加速度计底座与输出正常的电路组件装配后+1 g输出160 mV左右,输出值正常。

通过交换电路组件试验,发现加速度计输出异常故障原因与该加速度计底座无关。因此确定故障原因为该加速度计的放大器电路组件异常。

2.1.2 振荡器电路故障

针对可能存在的振荡器电路故障问题,通过交换电路组件,确定加速度计输出异常的原因在于该加速度计装配的振荡器电路组件异常。

将放大器电路故障问题与振荡器电路故障问题进行汇总,放大器及振荡器电路组件返回厂家作进一步排查,结果确定为振荡器电路故障引发的加速度计输出电压出现异常。

2.2 电路故障分析

2.2.1 振荡电路故障定位

根据振荡器电路详细规范电性能相关要求,对故障电路进行常温电性能测试,电路无输出。

对故障电路进行X射线检查,发现振荡电路内部二极管D4(1N4148)上键合金丝第一键合点根部断开,如图4所示。

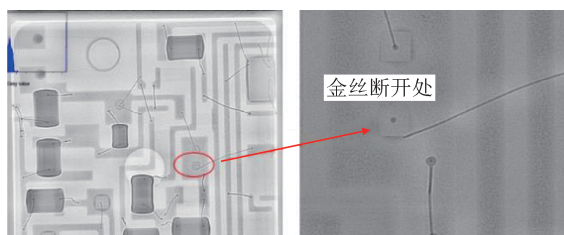


图4 振荡电路X射线照片

Fig.4 X-ray photographs of oscillating circuits

拆盖后在显微镜下目检,进一步验证了X射线检查结果并确定了此处不仅断开而且发生了偏移,如图5所示。

从X射线检查、电特性测试和内部目检结果均

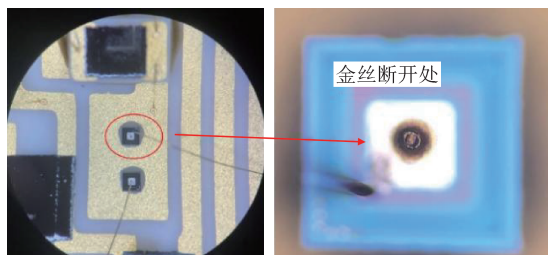


图5 振荡电路内部目检金丝断开图

Fig.5 Internal visual inspection of gold wire disconnection diagram in oscillation circuit

可知振荡电路无输出的原因为D4二极管芯片金丝断开。金丝断开导致该振荡器电路块功能失效(无输出),从而导致加速度计输出异常。

2.2.2 振荡电路故障分析

经过振荡器电路排查分析,故障电路在封壳前的多余物清除过程中,使用镊子夹出多余物时触碰到内部二极管D4金丝,导致其倒伏。发现二极管D4位置在目检清除多余物时被触碰倒伏,对倒伏的二极管D4处金丝进行了扶正,并进行了非破坏性拉力试验($2.4 \text{ g} \pm 0.3 \text{ g}$)和外观目检。

金丝经过第二次非破坏性键合拉力检验和外观目检均合格,但可能根部有微损伤。分析发现在金丝扶正过程中,对金丝根部造成了轻微损伤,疑似损伤根部,见图6(电镜分析结果,红色区域为根部受损区)。进一步对该电路进行后续环境及机械应力试验,金丝根部受损程度加深,使得金丝发生疲劳断裂,导致该电路功能失效(无输出),进而导致加速度计输出异常。

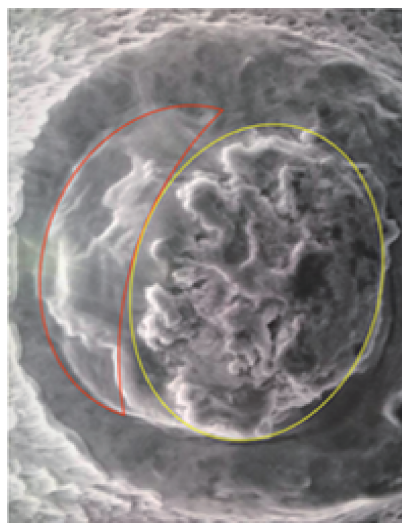


图6 故障金丝断开处断面图

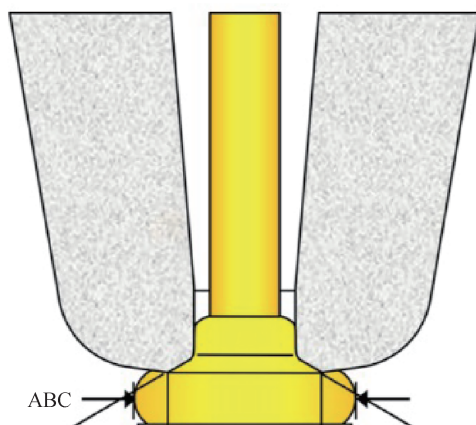
Fig.6 Cross section diagram of the broken gold wire

3 电路金丝断裂机理分析

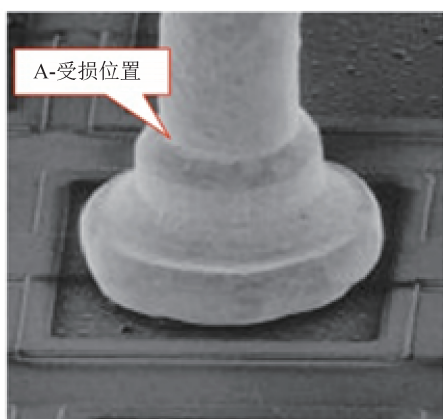
对金丝进行失效分析发现,键合丝断裂原因是由于受到交变应力作用产生疲劳断裂。

故障电路二极管D4使用的是直径 $25 \mu\text{m}$ 的金丝键合,键合时,劈刀端头的金丝在高电流作用下形成金球,金球在键合过程中,会随着劈刀压到芯片焊盘上。根据图7所示,劈刀内部形状会导

致压到焊盘上的金球呈现台阶状态。若金丝受损, 金丝会在最薄弱位置先缩颈, 即图 7 (b) 中的 A 位置。受损的金丝重新进行非破坏性拉力试验后, 受到二次应力作用, 受损程度加深, 此现象和断面分析结果一致。



(a) 劈刀内部形状图
(a) Internal shape diagram of the cleaver



(b) 金球台阶状态图
(b) Golden ball step state diagram

图 7 劈刀内部与金球台阶状态图

Fig.7 Diagram of the interior of cleaver and the golden ball step state

4 试验验证与措施

将故障电路的断裂金丝去除后, 重新键合 1 根新金丝, 该振荡器电路块功能正常。将重新键合好金丝的振荡电路, 以及与之配套的放大器电路, 重新装回该加速度计底座, 上电测得 +1 g 输出为 159.76 mV, -1 g 输出为 -159.73 mV, 输出值正常。在观测的时间期限内, 电路和加速度计均未再出现类似的故障。

通过试验验证, 振荡器电路中的 D4 二极管正

极金丝断裂为电路故障的原因, 也是加速度计输出异常(输出为 0V)的原因。

改进措施: 对于所有变形的金丝, 均不允许采取任何方式进行修正, 需将金丝拔除后重新进行复合键合返工。

5 结论

单轴摆式加速度计输出异常的故障分析是一个切实解决工程运用问题的方法, 对其进行研究具有重要的现实意义。文章提出了新的观点: 振荡器电路中 D4 二极管正极金丝断裂为电路故障的原因。对单轴摆式加速度计输出异常进行故障分析, 目的在于及时针对性采取纠正措施, 对提升加速度计在惯导系统和飞控系统的使用可靠性具有重要意义。

本研究归纳出可能出现的故障原因, 进行故障树分析, 理清故障原因, 更加快速准确地找到故障点, 对故障电路故障原因进行定位。在理论研究中, 融入加速度计组成及原理与加速度计故障机理分析, 有效结合电路金丝断裂机理分析方法, 进行试验和改进措施验证, 可得出如下层层递进的结论:

1) 振荡器电路中的 D4 二极管正极金丝断裂为电路故障的原因, 也是加速度计输出异常的故障原因。

2) 振荡器电路二极管 D4 金丝断开的原因: 先是多余物清理过程中, 造成二极管 D4 金丝倒伏; 接着金丝扶正时, 对金丝根部造成轻微损伤; 之后在电路试验和装机过程中, 在交变应力的作用下, 金丝根部损伤不断加剧; 最终金丝发生疲劳断裂。

3) 针对变形的金丝, 将金丝拔除后重新进行复合键合返工, 可从根本上提升加速度计输出可靠性。

参考文献

- [1] 赵虎, 王淦立, 刘海斌, 等. 高精度单晶硅挠性摆式加速度计组件的工程化实现[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25 (3): 360-364.
- ZHAO H, WANG S L, LIU H B, et al. Engineering implementation of high precision single crystal silicon flexible pendulum accelerometer components [J]. Chinese

- Journal of Inertial Technology, 2017, 25(3): 360-364. (in Chinese)
- [2] 雷鸣, 葛鑫, 董娟, 等. 仪表着陆信号发生器校准研究[J]. 计测技术, 2022, 42(3): 64-71.
LEI M, GE X, DONG J, et al. Research on calibration of instrument landing signal generator[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(3): 64-71. (in Chinese)
- [3] 邓盼盼, 潘良, 白亮. 一种高精度加速度计数字采集电路设计[J]. 电子设计工程, 2023, 31(20): 124-129.
DENG P P, PAN L, BAI L. Design of a high-precision accelerometer digital acquisition circuit[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(20): 124-129. (in Chinese)
- [4] GEORGE G, EFTHYMOS Z, ANDREAS L, et al. Accelerometers in our pocket: does smartphone accelerometer technology provide accurate data[J]. Sensors, 2022.
- [5] 董浩森, 边瑞卿, 张永杰, 等. 内弹道加速度信号误差优化方法研究[J/OL]. 火炮发射与控制学报, 2023.
DONG H S, BIAN R Q, ZHANG Y J, et al. Study on the optimization method of internal ballistic acceleration signal error [J/OL]. Journal of Artillery Launch and Control, 2023. (in Chinese)
- [6] 张朋好, 姜程, 崔奇等. 摆式加速度计零位偏离故障分析[J]. 计测技术, 2016, 36(3): 58-60.
ZHANG P H, JIANG C, CUI Q, et al. Analysis of zero position deviation fault in pendulum accelerometers [J]. Metrology & Measurement Technology, 2016, 36(3): 58-60. (in Chinese)
- [7] JANG J, HA C, CHU B, et al. Development of fault diagnosis technology based on spectrum analysis of acceleration signal for paper cup forming machine[J]. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 2016, 15(6): 1-8.
- [8] 段然. 单轴摆式伺服线加速度计悬丝断裂故障的分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2012, 30(3): 35-39.
DUAN R. Analysis of suspension wire fracture fault in single axis pendulum servo line accelerometers[J]. Reliability and Environmental Testing of Electronic Products, 2012, 30(3): 35-39. (in Chinese)
- [9] 何铁春, 周世勤. 惯性导航加速度计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
HE T C, ZHOU S Q. Inertial navigation accelerometer [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983. (in Chinese)
- [10] ANKUR V, GANNAVAPU R. Fast fringe analysis method using graphics processing unit acceleration for dynamic fault identification [J]. Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology, 2021.
- [11] SHI Y Y, JIA S S, LI Y, et al. Design and optimization of a triangular shear piezoelectric acceleration sensor for microseismic monitoring[J]. Geofluids, 2022.
- [12] 刘祥水. 某型惯性导航系统自锁故障分析[J]. 中国科技信息, 2020(12): 31-32, 34.
LIU X S. Analysis of a certain type of inertial navigation system self-locking fault[J]. China Science and Technology Information, 2020(12): 31-32, 34. (in Chinese)
- [13] 孙明阳, 游亚飞. 压电式加速度传感器故障查找[J]. 计测技术, 2010, 30(3): 56-58.
SUN M Y, YOU Y F. Fault finding of piezoelectric accelerometers [J]. Metrology & Measurement Technology, 2010, 30(3): 56-58. (in Chinese)
- [14] MA L, SHI H, PARK K, et al. Design optimization of bulk piezoelectric acceleration sensor for enhanced performance[J]. Sensors, 2019.

(本文编辑: 田艳玲)



第一作者: 党静 (1985—), 女, 工程师, 主要研究方向为惯测等装备研制、生产、维修以及质量问题处理等合同监管相关工作。